基于HI-13串列加速器的核天体物理研究

李家英豪　李云居　李志宏　王友宝　谌阳平　郭 冰　柳卫平

（中国原子能科学研究院　北京　102413）

摘要　中国原子能科学研究院核天体物理研究组在HI-13串列加速器核物理国家实验室建成了我国首条低能放射性次级束流线，产生了从^{6}He到^{22}Na等11种放射性核束，利用这些放射性束流通过测量逆运动学转移反应开展了一系列核天体物理重要反应的研究，另外还通过厚靶实验方法和电荷交换反应开展了天体物理相关重要核结构信息的研究。在串列加速器Q3D磁谱仪上，利用稳定束测量了许多单核子转移和α基团转移的角分布，基于渐进归一化系数（Asymptotic Normalization Coefficient，ANC）或谱因子方法得到了一系列天体物理关键反应的天体物理S因子和反应率，为元素丰度、天体模型等相关研究提供了重要实验依据。

关键词　核天体物理，次级束流线，Q3D磁谱仪，天体物理S因子

中图分类号　TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080002

Nuclear astrophysics research based on HI-13 tandem accelerator

LI Jiayinghao　LI Yunju　LI Zhihong　WANG Youbao　SHEN Yangping　GUO Bing　LIU Weiping

(*China Institution of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract　The first radioactive ion beam line, GIRAFFE, has been built at the CIAE HI-13 tandem accelerator in China. A total of eleven types of radioactive ion beam, including ^{6}He, ^{7}Be, and ^{8}Li, have been generated. Several significant reactions in nuclear astrophysics have been indirectly measured *via* transfer reactions, and research on nuclear structure, relevant to nuclear astrophysics, has been performed using charge exchange reactions and thick-target experimental methods. A series of single nucleon or α cluster transfer reactions have been measured using a Q3D magnetic spectrometer, and the astrophysical S-factors and reaction rates for essential reactions have been obtained. The obtained results serve as a crucial experimental foundation for research involving element abundance and celestial body models.

Key words　Nuclear astrophysics, Radioactive ion beam line, Q3D magnetic spectrometer, Astrophysical S-factor

核天体物理是原子核物理与天体物理相结合形成的交叉学科，应用核物理的知识和规律阐释恒星中核过程产生的能量及其对恒星结构和演化的影响；宇宙中各种化学元素的合成；白矮星、中子星、脉冲星和黑洞的形成；宇宙射线的起源及其与星际气体的相互作用；星系的化学演化以及中微子和γ射线天文。在特定的意义上说，其主要目标在于研究宇宙中各种元素及其同位素合成的过程、时标、物理环境、天体场所和丰度分布。

核过程不仅是恒星抗衡其自引力收缩的主要能

国家重点研发计划(No.2022YFA602301)、国家自然科学基金(No.12125509, No.1222514, No.12175152, No.12005304, No.11961141003, No.U1867214)资助

第一作者：李家英豪，男，1998年出生，2020年毕业于南昌大学，研究领域为核天体物理

通信作者：李云居，E-mail：li_yunju@ciae.ac.cn

收稿日期：2023-06-21，修回日期：2023-07-07

Suported by National Key Research and Development Program of China (No.2022YFA602301), National Natural Science Foundation of China (No. 12125509, No.1222514, No.12175152, No.12005304, No.11961141003, No.U1867214)

First author: LI Jiayinghao, male, born in 1998, graduated from Nanchang University in 2020, focusing on nuclear astrophysics

Corresponding author: LI Yunju, E-mail: li_yunju@ciae.ac.cn

Received date: 2023-06-21, revised date: 2023-07-07

源，亦是合成宇宙中除氢以外所有核素的唯一方法，在宇宙大爆炸之后几秒至恒星寿命终结之前的宇宙和天体演化进程中起到极为重要的作用。为了阐明恒星演化中能量的产生和各种核素的核合成过程及丰度分布，需要核物理实验及理论提供的精确可靠的核反应数据。由于恒星演化和核素合成涉及β稳定线及其两侧的数千种核素，而核反应在天体能区的截面极低，另外物理环境导致某些原子核低激发态的热布居和核过程与原子或等离子体过程的交融，使核物理实验和理论均面临非常严峻的挑战，因此，近几十年核天体物理是国际上高度重视的现代物理交叉学科，也一直是核物理的前沿方向之一。

中国原子能科学研究院（以下简称原子能院）核天体物理组于1993年建成了我国首条低能放射性次级束流线并成功出束[1]，从此开始了放射性核辐射俘获反应间接测量的研究，采用渐进归一化系数（Asymptotic Normalization Coefficient，ANC）方法得到了^{7}Be(p,γ)^{8}B、^{13}N(p,γ)^{14}O等关键反应的天体物理S因子，另外，还利用电荷交换反应^{1}H(^{6}He,^{6}Li*)n研究了^{6}Li第二激发态晕核结构，利用厚靶弹性共振散射方法研究了^{14}O、^{18}Ne、^{23}Mg等核天体物理相关不稳定核的能级信息。

核天体物理研究组充分挖掘了串列加速器和Q3D磁谱仪的能力，对探测设备、电子学及数据获取系统进行了升级和改造，进一步提高了磁谱仪的探测能力，测量了一系列(^{7}Li,^{6}Li/^{6}He)等单核子转移反应，精确得到了^{7}Li、^{9}Be、^{14}N、^{16}N等核的核谱因子或ANC，并拓展谱因子方法到阈上近阈共振的研究，另外系统性发展了(^{11}B,^{7}Li)转移反应的α俘获间接测量方法，分别研究了恒星中子源^{13}C(α,n)^{16}O、圣杯反应^{12}C(α,γ)^{16}O等核天体物理关键反应，大大提高了原有实验数据的精度。

总的来说，原子能院核天体物理组在串列加速器核物理国家实验室近30年的研究完成了大量核天体物理关键反应的间接测量，完善并拓展了间接测量的实验方法及相关理论，取得了丰硕的研究成果。

1 放射性核束的实验研究

1.1 次级束流线

放射性核素对于天体演化具有重要意义，虽然很多放射性核素半衰期很短，但在早期宇宙环境以及一些高温高密度天体环境中，放射性核素可以在短时间内参加各种核反应并生成其他核素，这些核反应会对多种核素（包括一些稳定核素的丰度）产生影响。大多放射性核素的半衰期很短，并不能将其制成反应靶，但可以采用逆运动学核反应产生次级放射性束流，再利用该束流完成核反应截面的测量。

原子能院核天体物理组于1993年建成了国内首条放射性次级束流线[1]，因象形得名GIRAFFE，并在随后的十几年里不断升级改造，最终的次级束流线概貌如图1所示，整个装置由初级反应气体靶、一个偶极磁铁和一对四级透镜及速度选择器组成的电磁分离聚焦纯化传输系统、次级反应靶室组成。

次级束流线在十几年的运行过程中产生了11种放射性束流，产生的放射性核束的种类、具体产生反应以及束流性能指标列于表1，除^{19}Ne与^{22}Na束流外，多数放射性核素束流具有较好的品质。核天体物理研究组采用这些放射性核束，测量了许多天体物理关键核反应的截面，取得了许多核天体物理的重要研究成果。

表1 次级束流线产生的放射性束流
Table 1 Radioactive nuclear beams produced by GIRAFFE

束流 Beams	产生反应 Producing reaction	能量±半宽 Energy±half-width / MeV	纯度 Purity / %	强度 Intensity / pps
^{6}He	^{2}H(^{7}Li, ^{6}He)^{3}He	37.3±0.5	99	450
^{7}Be	^{1}H(^{7}Li, ^{7}Be)n	30.8±1.3	99	900
^{8}Li	^{2}H(^{7}Li, ^{8}Li)p	40.0±0.5	88	2 000
^{10}C	^{1}H(^{10}B, ^{10}C)n	55.9±3.5	96	200
^{11}C	^{1}H(^{11}B, ^{11}C)n	63.4±2.7	80	1 000
^{13}N	^{2}H(^{12}C, ^{13}N)n	57.8±2.1	92	1 200
^{15}O	^{2}H(^{14}N, ^{15}O)n	66.0±3.6	91	800
^{17}F	^{2}H(^{16}O, ^{17}F)n	76.1±3.7	90	2 000
^{18}F	^{3}He(^{16}O, ^{18}F)p	75.7±2.2	85	800
^{19}Ne	^{4}He(^{16}O, ^{19}Ne)p	56.6±3.4	47	120
	^{3}He(^{19}F, ^{19}Ne)^{3}H	68.6±3.8	42	70
^{22}Na	^{4}He(^{19}F, ^{22}Na)n	52.9±1.9	57	100

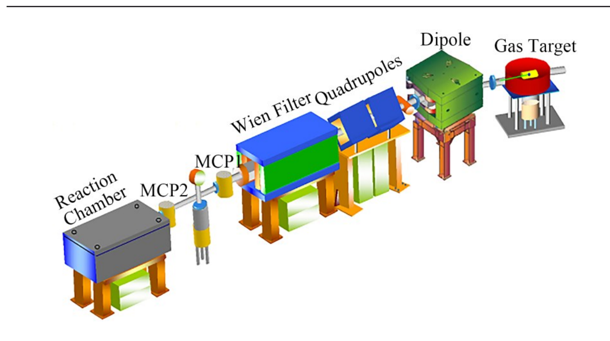


图1 北京HI-13串列加速器放射性次级束流线效果图
Fig.1 Radioactive secondary beam line in HI-13 tandem accelerator

1.2 直接俘获的间接测量

部分放射性核参与的核反应在元素核合成过程中非常重要，诸如与太阳中微子丢失之谜直接相关的^{7}Be (p, γ) ^{8}B反应[2]、高温碳氮氧循环的开关^{13}N(p,γ)^{14}O反应[3]、大爆炸核合成非标模型中跨越不稳定核间隔的^{8}Li(n,γ)^{9}Li反应[4]等，由于放射性核不能制作反应靶，中子更不能制成反应靶，同时由于天体能区的截面极低，很难利用放射性束流进行直接测量，因此，只能用间接方法得到这些反应的天体物理S因子和反应率。在次级束流线上通常通过测量(d,n)和(d,p)等质子或中子转移反应的逆运动学角分布，基于扭曲波玻恩近似(Distorted Wave Born Approximation，DWBA)分析，提取目标核的核谱因子，进而根据辐射俘获理论计算出质子或中子俘获反应的天体物理S因子和反应率。

利用次级束流线上产生的放射性核束轰击氘化聚乙烯靶，在下游位置放置一块Δ*E*探测器和环形探测器组成Δ*E*-*E*探测器望远镜系统对出射离子进行鉴别测量。在测量(d,p)反应时可以在反角位置放置一块环形探测器以测量反冲的质子。典型的实验设置如图2所示。

当测量得到了A(d,n/p)B反应角分布后，可通过对比实验结果与DWBA的计算结果来得到目标核B的核谱因子或ANC，如式(1)所示：

$$(\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}\Omega)_{\exp} = \sum_{l_f j_f}(C^{\mathrm{d}})^2 (C^{\mathrm{B}}_{l_f j_f})^2 R_{l_f j_f} = \sum_{l_f j_f} S^{\mathrm{d}} S^{\mathrm{B}}_{l_f j_f} (\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}\Omega)^{l_f j_f}_{\mathrm{DWBA}} \quad (1)$$

式中：$(\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}\Omega)_{\exp}$为实验测量角分布；$S^{\mathrm{d}}$与$S^{\mathrm{B}}_{l_f j_f}$分别为氘核与B核的谱因子；$C^{\mathrm{d}}$与$C^{\mathrm{B}}_{l_f j_f}$分别为氘核的质子ANC与B核的质子或中子ANC；$l_f$与$j_f$分别为B核中转移质子或中子的轨道角动量与总角动量；$(\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}\Omega)^{l_f j_f}_{\mathrm{DWBA}}$为DWBA计算曲线$R_{l_f j_f}$可通过DWBA计算得到，表达式如下：

$$R_{l_f j_f} = \frac{\sigma^{\mathrm{DWBA}}_{l_f j_f}}{(b^{\mathrm{d}})^2 (b^{\mathrm{B}}_{l_f j_f})^2} \quad (2)$$

式中：$\sigma^{\mathrm{DWBA}}_{l_f j_f}$为DWBA理论计算的微分截面；$b^{\mathrm{d}}$为氘核与B核中束缚态质子或中子的ANC。因此，根据已知的d质子或中子ANC或谱因子，即可得到末态核的ANC或谱因子，进而根据辐射俘获理论计算出目标反应A(p/n,γ)B直接俘获过程的天体物理S因子或反应率。

^{7}Be(p,γ)^{8}B反应是太阳中^{8}B的产生反应，也是解释太阳中微子丢失之谜的关键反应，该反应在天体能区的贡献主要来自于直接俘获过程，因此其零能量天体物理S因子S_{17}(0)可直接根据^{8}B的质子ANC或谱因子计算得到，中国原子能科学研究院核天体物理研究组于1996年首次应用ANC方法对该反应进行了研究[2]。首先利用次级束流线上产生的^{7}Be束流轰击氘化聚乙烯靶，通过逆运动学测量了质心系能量5.8 MeV下^{7}Be(d,n)^{8}B转移反应的角分布，如图3所示，利用DWBA计算分析导出了^{8}B的质子ANC，进而计算出了^{7}Be(p,γ)^{8}B反应的天体物理S因子，为太阳中微子丢失现象提供了新的实验证据，发表了国内第一篇核物理实验方面的*Physics Review Letter*文章。

^{13}N(p,γ)^{14}O反应是CNO循环向高温CNO循环的转化反应。对比两个循环，高温CNO循环涉及的^{14}O的β^+衰变($T_{1/2}$=70.6 s)比CNO循环中^{13}N的β^+衰变($T_{1/2}$=9.965 m)要快得多，所以高温CNO循环产生能量要比CNO循环快得多。当CNO循环向高温CNO循环转化时，能量产生率会发生快速变化，因此研究其转化反应^{13}N(p,γ)^{14}O的反应率对研究CNO循环和高温CNO循环相互转化的温度密度条件有重要意义。

在天体物理感兴趣能区，^{13}N(p,γ)^{14}O反应主要由1^-宽共振(E_{R}=527.9 keV)在Gamow窗口内的低能尾巴决定。已经有相当多的实验工作对该共振作了

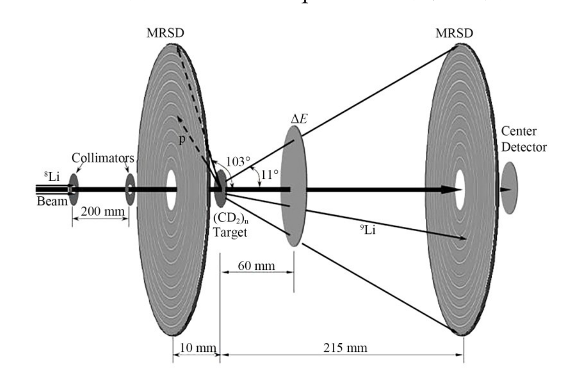


图2 典型的放射性核束逆运动学实验设置图[4]
Fig.2 Typical inverse kinematics experiment setup for radioactive beam[4]

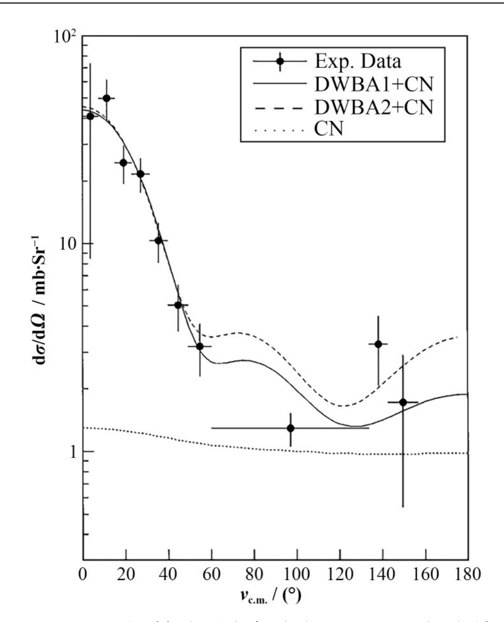


图3　^{7}Be(d, n)^{8}B转移反应角分布及DWBA拟合结果[2]
Fig.3　Angular distribution of ^{7}Be(d, n)^{8}B transfer reaction and DWBA fitting results[2]

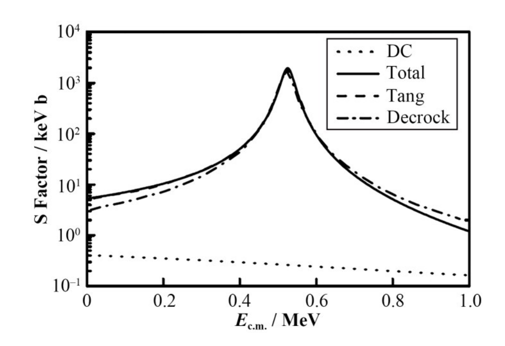
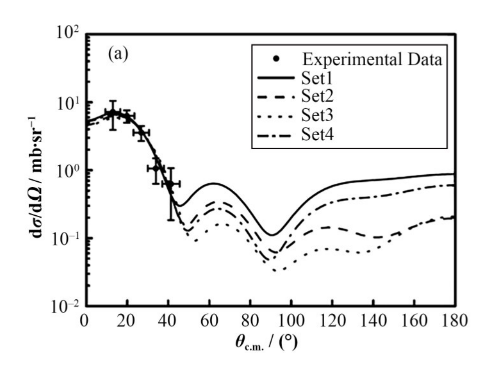


图4　核天体物理组^{13}N(p, γ)^{14}O反应的天体物理S因子结果与之前结果的对比[3]
Fig.4　Comparison between astrophysical S-factor of ^{13}N(p, γ)^{14}O obtained by Nuclear Astrophysics Research Group and other results[3]

研究，其中包括^{13}N束流的直接测量[5-6]、粒子转移反应[7-10]和库仑离解测量[11-12]。这些研究很好地确定了1⁻宽共振的共振参数。直接俘获贡献在Gamow窗口内远低于1⁻共振俘获的低能尾巴，但是直接俘获与共振俘获的干涉可能会对结果有不可忽略的影响。因此，直接俘获贡献的研究对于精确给出^{13}N(p，γ)^{14}O的天体物理S因子和反应率是非常重要的。2006年核天体物理组在次级束流线上测量了^{13}N(d，n)^{14}O反应的角分布，导出了^{14}O的质子ANC，并结合R矩阵计算给出了^{13}N(p，γ)^{14}O反应的天体物理S因子和反应率[3]，如图4所示，该工作由于考虑了直接过程的贡献，所得到的总S因子比文献[13]的结果大40%左右，与文献[14]给出的结果一致。计算得到的反应率数据在T_9(以K为单位的温度)<0.1的温度范围内比NACRE数据库采用的结果大两倍左右。

与^{13}N(p，γ)^{14}O反应类似，快速αp(rap)过程第二和第三分支的关键反应^{11}C(p，γ)^{12}N在天体物理感兴趣的温度范围内，天体物理反应率的贡献主要来自于直接俘获和共振俘获的贡献。同样，核天体物理组在次级束流线上通过逆运动学测量^{11}C(d，n)^{12}N反应的角分布，导出了^{12}N的质子ANC，并计算了^{11}C(p，γ)^{12}N反应直接俘获的天体物理S因子和反应率[15]。

原子核质量数A=8处没有稳定核，^{8}Li在大爆炸原初核合成非标准模型和二类超新星爆发的r过程中起重要作用，^{8}Li(p，γ)^{9}Be和^{8}Li(n，γ)^{9}Li是跨跃A=8稳定核间隙的重要反应，这两个反应在次级束流线上均利用^{8}Li束进行了间接测量，分别通过逆运动学测量得到了^{8}Li(d，n)^{9}Be和^{8}Li(d，p)^{9}Li的反应角分布，根据DWBA分析提取了^{9}Be的质子谱因子和^{9}Li的中子谱因子，进而在国际上首次得到了^{8}Li(p，γ)^{9}Be和^{8}Li(n，γ)^{9}Li的直接俘获截面和天体物理反应率[4,16]，其中，^{8}Li(d，p)^{9}Li的反应角分布和^{8}Li(n，γ)^{9}Li的天体物理反应率如图5所示，可以看出，当T_9<1时，直接俘获起主要贡献。



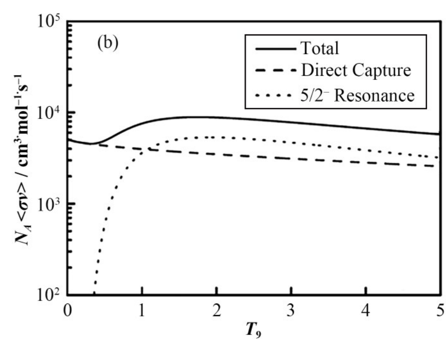


图5　(a) ^{8}Li(d, p)^{9}Li的反应角分布和4组DWBA分析结果，(b) ^{8}Li(n, γ)^{9}Li的天体物理反应率[4]
Fig.5　Angular distribution of ^{8}Li(d, p)^{9}Li reaction and four DWBA results (a) and the astrophysics reaction rate of ^{8}Li(n, γ)^{9}Li (b)[4]

1.3 利用镜像核方法开展的核天体物理研究

镜像核电荷对称性的ANC方法与常规的ANC方法不完全相同。镜像核是质量数相等的两个核，交换其中一个核的质子数与中子数就得到另外一个核。由于核力与电荷近似无关，所以一对镜像核的两条对应能级的结构具有相似性。假设B核与D核互为镜像核，那么我们就可以通过研究更容易测量的B核来间接地得到目标核D的信息。以研究C(p,γ)D反应为例来说，常规的ANC方法中需要测量质子转移反应，比如C(d,n)D反应，然后通过DWBA分析导出D核的质子ANC，进而可以得出C(p,γ)D反应直接俘获的天体物理S因子和反应率。结合镜像核电荷对称性的ANC方法中测量的是镜像核中子转移反应，比如A(d,p)B反应，通过DWBA分析导出B核的中子ANC，然后利用镜像核电荷对称性导出D核的质子ANC或质子宽度，进而可以得出C(p,γ)D反应的天体物理S因子和反应率。

核天体物理组采用结合镜像核电荷对称性的ANC方法研究了恒星演化进程中氢燃烧阶段的4个重要反应，分别是^{8}B(p,γ)^{9}C、^{11}C(p,γ)^{12}N、^{13}N(p,γ)^{14}O和^{26}Si(p,γ)^{27}P[17−20]。

^{8}B(p,γ)^{9}C反应是pp反应链第四分支与快速αp过程第一分支中的重要反应之一。根据次级束流线上测量的^{8}Li(d,p)^{9}Li反应的角分布，通过DWBA分析导出了该反应道的积分截面和^{9}Li基态的中子ANC。然后，根据镜像核的电荷对称性给出了^{9}C基态的质子ANC，进而导出了^{8}B(p,γ)^{9}C反应直接俘获得天体物理S因子和反应率。此外也利用已有的共振参数计算了^{9}C第一激发态共振俘获的反应率。结果表明，在天体物理感兴趣的温度范围内，直接俘获占主要贡献。

通过分析中子转移反应^{11}B(d,p)^{12}B布居^{12}B基态、第一激发态和第二激发态的角分布，导出了这三个态的中子ANC，然后根据镜像核的电荷对称性得出了^{12}N基态的质子ANC以及2^{+}和2^{-}两个共振态的质子宽度。进而导出了^{11}C(p,γ)^{12}N反应的天体物理S因子和反应率，总的S因子和反应率包括直接俘获、两个共振俘获以及直接俘获与2^{-}共振俘获干涉的贡献。结果表明：在T_9<0.35时直接俘获占主要贡献，T_9>0.35时，2^{+}共振俘获占主要贡献，通过分析中子转移反应^{13}C(d,p)^{14}C布居的角分布，导出了^{14}C基态的中子ANC，进而根据镜像核的电荷对称性得出了^{14}O基态的质子ANC，结合***R***矩阵计算了^{13}N(p,γ)^{14}O反应的天体物理S因子和反应率，所得结果与利用^{13}N(d,n)^{14}O反应间接测量结果一致。

^{26}Si(p,γ)^{27}P反应可能影响γ射线天文学重要核素^{26}Al基态和同核异能态的平衡丰度。同样利用镜像核方法分析了中子转移反应^{26}Mg(d,p)^{27}Mg布居基态、第一激发态和第二激发态的角分布，导出了这三个态的中子ANC，然后得出了^{27}P基态的质子ANC以及$3/2^{+}$和$5/2^{+}$两个共振态的质子宽度，进而导出^{26}Si(p,γ)^{27}P反应的天体物理S因子和反应率，第一次从实验上给出了^{26}Si(p,γ)^{27}P反应的直接俘获贡献。结果表明：在T_9<0.1的温度范围内，直接俘获在^{26}Si(p,γ)^{27}P反应中占主要贡献。

本方法更充分地利用了HI-13串列加速器次级束流线GIRAFFE上已有的放射性次级束流，拓宽了实验研究的范围，间接得出了仍无实验数据的质子辐射俘获反应截面或减小了不确定性。

1.4 相关核结构的研究

核天体物理组利用次级束流线上产生的放射性束流还进行了一些核结构方面的研究，主要有晕核方面的探索及利用厚靶弹性共振散射方法开展的能级性质方面的研究。

早在2002年，利用25 MeV的^{6}He束流，测量了逆运动学反应^{1}H(^{6}He,^{6}Li)n布居3.563 MeV激发态的角分布[21−22]，如图6所示，从实验测量结果来看，该反应的角分布在质心系90°附近有相当大的反应截面，只有采用带有晕结构的^{6}Li与^{6}He进行DWBA计算才能与实验数据较好地符合，这证明了^{6}He与^{6}Li*$_{3.563}$均有晕结构，其中^{6}He为双中子晕核结构，^{6}Li*$_{3.563}$为质子-中子晕，这是首次发现^{6}Li的3.563 MeV 0^{+}态具有晕结构，该研究验证了稳定核某些激发态也会像中子滴线核一样具有晕结构的理论预言，同时为放射性核束实验研究提供了一个新思路。

弹性共振散射方法主要用于研究反应的共振俘

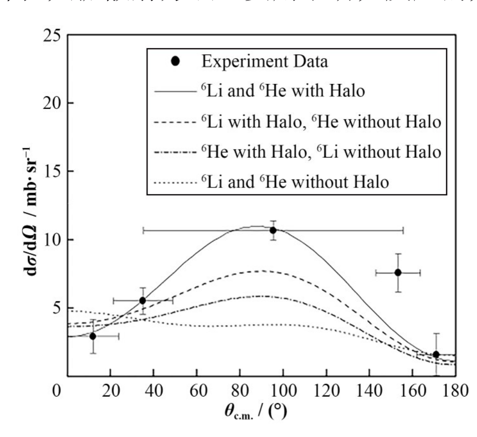


图6 ^{1}H(^{6}He, ^{6}Li)n反应角分布及不同DWBA计算结果的对比[21]

Fig.6 Comparison between the angular distribution of ^{1}H(^{6}He, ^{6}Li)n reaction and different DWBA results[21]

获过程，通过测量弹性共振散射反应的激发函数得到复合核的共振能量、自旋宇称及能级宽度，进而结合 ***R*** 矩阵计算来得到共振俘获反应的天体物理反应率。厚靶弹性共振散射实验是将束流的大部分甚至全部能量阻止在反应靶中，束流在被阻止的过程中不断损失能量，同时与靶核不断发生反应，激发函数可以通过单一束流能量得到。核天体物理组利用 ^{13}N 和 ^{17}F 放射性束流进行了厚靶弹性共振散射实验[23–25]。

^{13}N+p 实验得到的激发函数结果如图7所示，该实验首次观测到了 ^{14}O 激发能 5.7 MeV 处的 0^- 新能级，并确定了 6.8 MeV 能级的自旋，同时得到了图中所列能级的共振参数，对已有的实验数据提供了一个独立的交叉检验。

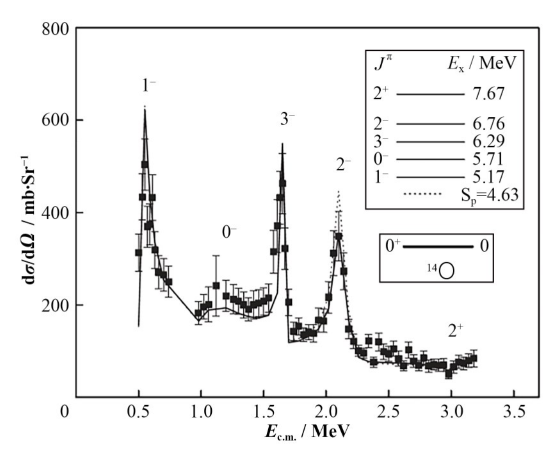


图7　^{13}N+p 弹性散射激发函数及 ***R*** 矩阵分析结果[23]
Fig.7　Exciting function of ^{13}N+p elastic resonance scattering and results analyzed by ***R***-matrix[23]

^{17}F+p 弹性共振散射实验得到的激发函数如图8所示，结合 ***R*** 矩阵分析得到了 ^{18}Ne 质子阈上 4.52 MeV 和 5.11 MeV 两个能级的自旋、宇称和质子宽度，这两个能级分别对应于 ^{17}F(p, γ)^{18}Ne 的 0.60 MeV 和 1.19 MeV 共振，并根据实验得到的共振参数计算出了 ^{17}F(p,γ)^{18}Ne 的天体物理反应率，其中 0.60 MeV 共振在 T_9>0.5 时起主导作用。

2　稳定核辐射俘获反应研究

2.1　Q3D磁谱仪

Q3D磁谱仪是由瑞典Scanditronix公司设计、北京串列加速器核物理国家实验室引进的大型磁谱仪，Q3D是由麻省理工学院Enge教授在多间隙磁谱和分离极磁谱仪的基础上设计的[26]。Q3D磁谱仪的优势在于其能量分辨高、色散大、动量接收度高以及运动学修正能力强。如图9所示，Q3D磁谱仪系统由一个可旋转靶室、一个四级磁铁、三个二级磁铁、

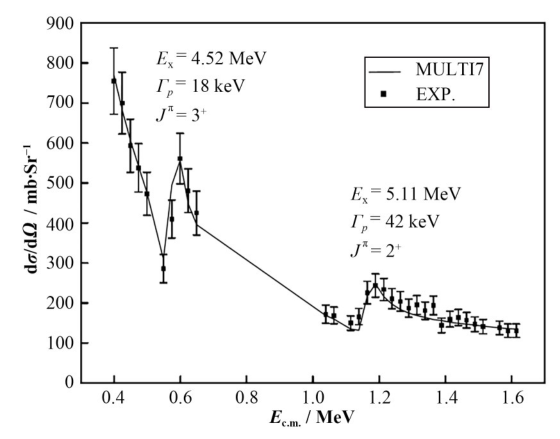


图8　^{17}F+p 弹性共振散射实验激发函数及 ***R*** 矩阵拟合结果[25]
Fig.8　Exciting function of ^{17}F+p elastic resonance scattering and results analyzed by ***R***-matrix[25]

两个多级磁铁以及探测器室组成。

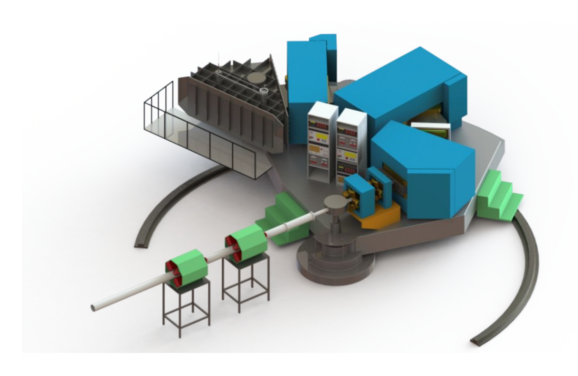


图9　Q3D磁谱仪效果图
Fig.9　Q3D magnetic spectrometer

理论上，Q3D磁谱仪的动量分辨约为万分之一，能量分辨为万分之二，但实际上受加速器提供的束流品质的影响，如束斑大小、在靶中反应位置不同造成的能量岐离以及反应产物穿过靶后的角度离散等因素，都会造成反应出射离子在焦平面位置上的展宽，从而导致Q3D的能量分辨降低。另外，Q3D磁谱仪可以在−22°~155°之间连续转动，角度读出误差为±0.02°，因此，Q3D磁谱仪非常适合精确测量反应的角分布。

Q3D磁谱仪最初配套的焦面探测器为单丝电离室，有效探测长度约1 m。但气体电离室只适用于测量氢、氦等较轻的离子，更重的离子则在电离室窗上损失能量过高，并不适合用气体电离室进行测量，因此需要对焦面探测器进行改造。

核天体物理组自2009年以来，尝试使用能提供二维位置或准二维位置灵敏的硅探测器进行测量，最终采用了与MICRON公司联合开发的X4型准二维位置灵敏硅探测器。X4探测器有效探测面积为75 mm×40 mm，垂直方向分为8条，水平方向两端引出信号，根据两端信号的差异来计算测量离子的位

置信息，其位置分辨可达到0.4 mm（Full Width Half Maximum，FWHM）。我们将6块X4探测器以55 mm为间隔安装在移动精度为微米级的移动平台上组成探测器阵列，如图10所示，通过两次位置差为65 mm的接谱式测量，可覆盖焦平面800 mm，这样在Q3D磁谱仪上就实现了较重离子的测量，在十几年的时间里分别利用d、^{6}Li、^{7}Li、^{9}Be、^{11}B、^{12}C、^{13}C、^{16}O、^{23}Na等束流开展了弹性散射、单核子转移、α基团转移等多种不同类型的实验研究。

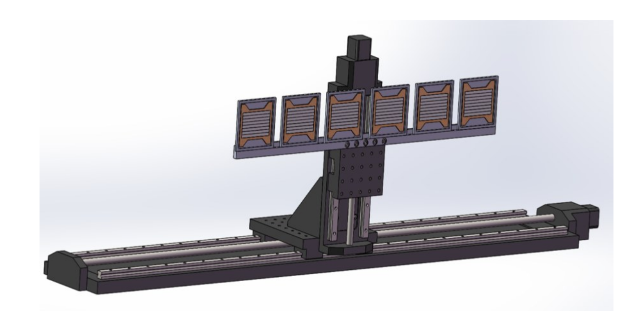


图10 二维位置灵敏X4硅探测器阵列效果图
Fig.10 Two-dimensional position-sensitive X4 silicon detector array

2.2 单核子转移反应

鉴于Q3D磁谱仪具有非常好的能量和角度分辨，可能过焦面探测器的能量和位置信息轻松实现离子鉴别，同时可实现接近零度角分布的精细测量，非常有利于提取核谱因子或ANC。核天体物理组在次级束流线上通过测量^{6}He(d,n)^{7}Li反应精确确定了^{7}Li的质子谱因子[27]，DWBA计算的(^{7}Li,^{6}He)反应角分布可以很好地符合实验测量结果，同时(^{7}Li,^{6}He)反应出射的^{6}He离子磁刚度较高不容易受到干扰，因此在Q3D磁谱仪上(^{7}Li,^{6}He)反应常被选为工具反应来提取目标核的质子谱因子。我们首先在Q3D磁谱仪上测量了转移反应^{12}C(^{7}Li,^{6}He)^{13}N与^{13}C(^{7}Li,^{6}He)^{14}N的角分布[28–29]，同时测量了入射道弹性散射角分布以抽取光学势参量，典型的角分布测量结果如图11所示，最终结合DWBA分析得到了较为精确的^{13}N与^{14}N的质子谱因子，与国际上已有的大多结果在误差范围内基本一致，从而验证了我们的实验结果的可靠性，根据所得谱因子结果对CNO循环关键反应^{12}C(p,γ)^{13}N与^{13}C(p,γ)^{14}N的较高能量直接测量数据进行拟合分析，得到了这两个质子俘获反应的零能量天体物理S因子与反应率，并修正了现有的共振参量。

^{9}Be质子谱因子的实验结果一直以来存在很大差异，基于以上得到的^{14}N的质子谱因子，我们设计测量了^{13}C(^{9}Be,^{8}Li)^{14}N反应的角分布[30]，利用^{14}N的质子谱因子来得到^{9}Be的质子谱因子，所得角分布

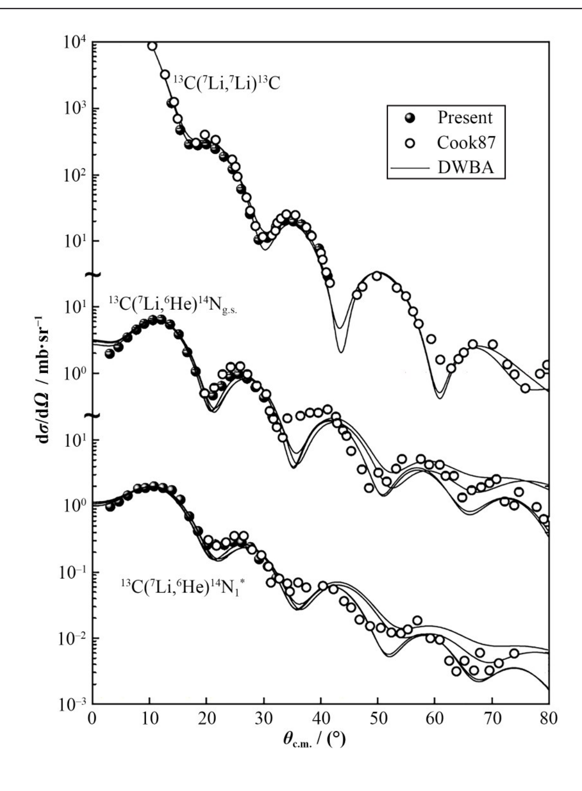


图11 ^{13}C(^{7}Li, ^{6}He)^{14}N反应布居基态和第一激发态以及入射道弹性散射的角分布，DWBA计算结果很好地重现了实验数据[29]
Fig.11 Angular distribution of ^{13}C(^{7}Li, ^{6}He)^{14}N reaction producing ^{14}N ground state and the first excited state — the DWBA results reproduced the experimental data well[29]

及理论计算结果如图12所示，明显比在次级束流线上利用^{8}Li束流得到的测量结果更为精确可靠[31]，最终得到的^{9}Be质子谱因子与国际上此前所有结果的平均值相符合，从而消除了存在的分歧。

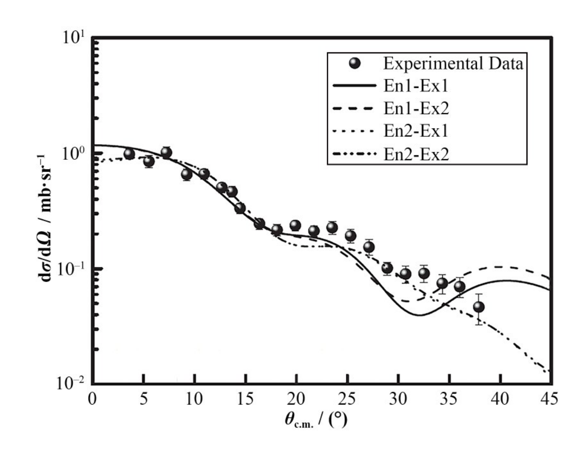


图12 ^{13}C(^{9}Be, ^{8}Li)^{14}N反应角分布及四组理论计算结果[30]
Fig.12 Angular distribution of ^{13}C(^{9}Be, ^{8}Li)^{14}N reaction and four sets of theoretical calculation results[30]

在Q3D磁谱仪上还利用(^{7}Li,^{6}He)反应开展了(p,γ)共振俘获的共振强度的间接测量。首先，测量了^{25}Mg(^{7}Li,^{6}He)^{26}Al反应布居对应58 keV阈上态的角分布[32]，另外，还首次利用X4探测器阵列通过接

谱式测量得到了该转移反应布居基态和前10个激发态的角分布，所得能谱如图13所示，DWBA计算很好地符合了所有的角分布，进行提取了^{26}Al*$_{6.356}$的质子谱因子，并根据$\Gamma_p=C^2S_p\times\Gamma_{sp}$计算出了58 keV共振态的质子宽度，其中：$C^2$为CG系数，$S_p$为谱因子，$\Gamma_{sp}$为计算的单粒子宽度。共振强度：

$$\omega\gamma_i=\frac{(2J_i+1)}{(2j_p+1)(2j_t+1)}\cdot\frac{\Gamma_p\Gamma_\gamma}{\Gamma_p} \tag{3}$$

其中J_i、j_p、j_t分别为共振态、入射粒子和靶核的自旋，由于^{25}Mg(p，γ)^{26}Al反应58 keV共振(E_x=6.364 MeV，J^π=3$^+$)的γ宽度与总宽度之比$\Gamma_\gamma/\Gamma_{tot}\approx$1[32]，这样就根据测得的谱因子结果计算得到了该共振的共振强度。本研究消除了国际上此前谱因子结果存在的两倍差异，最终得到的^{25}Mg(p,γ)^{26}Al天体物理反应率的结果在该共振起作用的温度范围比NACRE大了约15%，反应率误差减小了约一半。

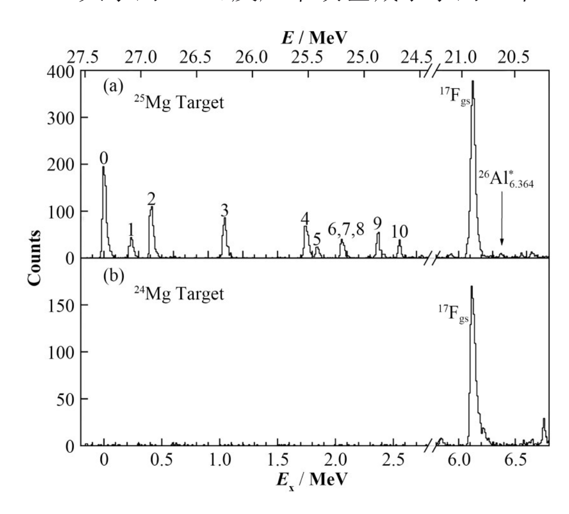


图13　^{25}Mg(^{7}Li, ^{6}He)^{26}Al反应的效应与本底谱[32]
Fig.13　Effect spectrum and background spectrum of ^{25}Mg(^{7}Li, ^{6}He)^{26}Al reaction[32]

为研究^{15}N(n,γ)^{16}N反应，在Q3D磁谱仪上测量了^{15}N(^{7}Li,^{6}Li)^{16}N反应布居4个阈下态的角分布，同样，为消除光学势带来的不确定性，还分别测量了^{6,7}Li分别与^{14,15}N相互作用的弹性散射角分布，最终得到的转移反应角分布及理论计算结果如图14所示，计算结果同样很好符合了实验数据，从而提取了^{16}N 4个阈下态的中子谱因子，并计算了^{15}N(n,γ)^{16}N反应的天体物理反应率[33]，同时还根据镜像核方法确定了^{15}O(p,γ)^{16}F反应4个共振态的质子宽度[34]。

除了(^{7}Li,^{6}He)和(^{7}Li,^{6}Li)两种单核子转移反应外，还利用(d,p)反应与(^{13}C,^{12}C)反应等确定了Zr和Sn系列同位素的中子谱因子[35-36]，此外还开展了^{6}Li(^{7}Li,^{6}Li)^{7}Li和^{12}C(^{11}B,^{12}C)^{11}B等弹性转移反应角分布的测量，弹性转移反应的优势在于进行

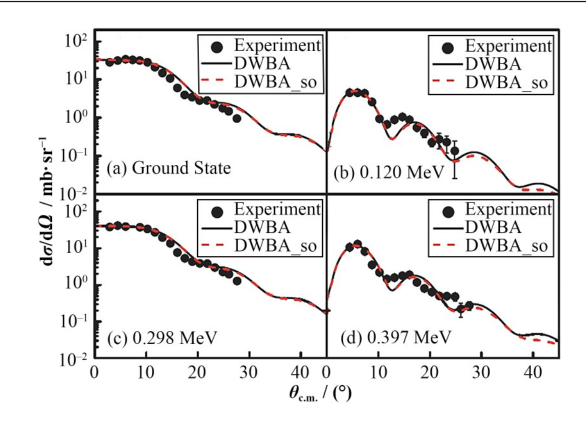


图14　^{15}N(^{7}Li, ^{6}Li)^{16}N反应的角分布与计算结果[33]
Fig.14　Angular distribution and calculation results of ^{15}N(^{7}Li, ^{6}Li)^{16}N reaction[33]

DWBA分析时不用引入其他核的谱因子或ANC，自然就不会代入其他谱因子或ANC的误差，利用这两个反应分别提取的^{7}Li的中子谱因子和^{12}C的质子谱因子，进而可以进一步计算得到^{6}Li(n,γ)^{7}Li[37]和^{11}B(p,γ)^{12}C[38]反应的天体物理反应率。

3　α基团转移反应

α基团俘获反应是天体核合成过程中具有重要意义的一大类反应，其中包括如氦燃烧过程关键反应^{12}C(α,γ)^{16}O、快速αp过程中关键反应^{7}Be(α,γ)^{11}C以及^{13}C(α,n)^{16}O和^{22}Ne(α,n)^{25}Mg等中子俘获过程中的一系列中子源反应等。这些反应的天体物理S因子、反应截面和反应率是核天体物理网络模型计算的关键输入量，对它们的准确实验测量极大地影响着我们对于恒星演化及中重元素核合成过程的理解。

基于转移反应的ANC方法利用α基团转移反应来布居α基团俘获反应中起到重要贡献的能级，结合DWBA给出阈上态的能级α基团宽度和阈下态的约化宽度和ANC，输入到Breit-Wigner公式或***R***矩阵计算中得到俘获反应的反应截面和反应率。常用的α基团转移反应系统包括(^{6}Li,d)、(^{7}Li,t)和(^{11}B,^{7}Li)，其中由于^{11}B的α分离能比^{6}Li和^{7}Li高，因此(^{11}B,^{7}Li)转移体系在转移过程中的破裂道贡献和复合核贡献更小，直接过程占据主导，更加利于简化实验数据的理论分析过程，导出的能级信息系统误差更小。核天体物理团队利用(^{11}B,^{7}Li)转移体系在Q3D磁谱仪完成了^{13}C(α,n)^{16}O、^{12}C(α,γ)^{16}O、^{7}Li(^{6}Li,d)^{11}B等反应的研究工作。

^{13}C(α,n)^{16}O是s-过程主中子源反应，其天体物理S因子的精确测量一直是重点研究课题。国际上已有的三个工作给出的天体物理S因子相差5~25倍[39-41]，如图15所示[42]。因此，为理解其结果的巨大

分歧，我们于2011年首次采用(^{11}B，^{7}Li)转移体系完成了一个新的α基团转移反应实验。结果证明：实验结果不随转移体系的不同和能量的变化而改变，否定了意大利核物理研究所(Istituto Nazionale di Fisica Nucleare，INFN)研究人员关于该分歧来源于间接测量方法的观点[43]，最终理解并澄清了S因子数据间5~25倍的分歧[42]。该工作是《天体物理期刊(*Astrophysical Journal*)》首次刊登的我国核物理实验研究成果。

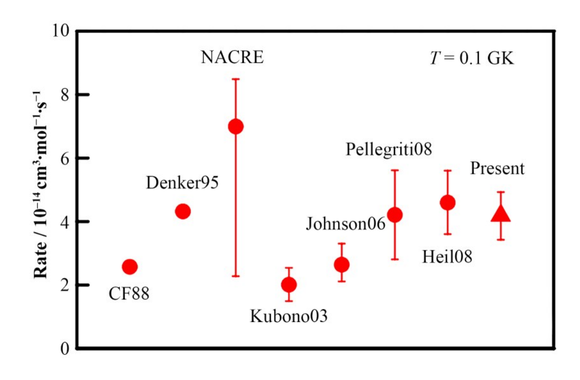


图15 ^{13}C(α, n)^{16}O天体物理反应率结果的比较[42]
Fig.15 Comparison of results of astrophysical reaction rates of ^{13}C(α, n)^{16}O[42]

^{11}B基态谱幅度是采用(^{11}B，^{7}Li)体系进行DWBA计算时的关键输入量。然而，此前一直仅有两家理论计算给出的理论预言值[44-45]，缺乏可靠的实验数据。我们采用^{7}Li(^{6}Li，d)^{11}B反应，首次实验测定了^{11}B的基态谱幅度。新结果表明：过去采用壳模型谱幅度会导致^{12}C(α，γ)^{16}O和^{13}C(α，n)^{16}O反应的天体物理S因子分别被高估23%和34%，这将对理解星体氦燃烧和宇宙元素起源带来影响，该结果证明使用^{11}B谱幅度实验数据的重要性，为(^{11}B，^{7}Li)转移体系在天体核反应上的应用提供了基础数据[46]。

^{12}C(α，γ)^{16}O反应是氦燃烧过程中的关键反应，它与3α过程竞争，决定了宇宙中碳和氧元素的丰度比，而碳氧丰度比对生命起源、大质量恒星演化和元素合成有重要影响，其精确测量被公认为核天体物理领域最关键的科学问题之一[47]，被誉为核天体物理中的“holy grail”(圣杯)。恒星演化模型计算对该反应截面精度的要求是好于10%，然而，目前各种测量方法得到的截面(S因子)误差还远远达不到模型要求的精度。由于^{16}O束缚态势的不确定性，使得^{16}O基态渐进ANC结果存在240倍分歧[48-51]，导致无法准确给出^{12}C(α，γ)^{16}O反应E2截面。我们通过自主建立的、破裂效应干扰更小的(^{11}B，^{7}Li)转移反应方法，通过角分布的精确测量和^{16}O束缚态势的有效约束，获得高精度的^{16}O基态ANC为(337±45) fm$^{-1/2}$，澄清了国际数据间240倍的分歧[52]。使用新ANC得出^{12}C(α，γ)^{16}O反应的SE2(300)因子为(70±7) keV b，比国际最新推荐值[15]增加了55%。而且，用直接测量数据约束的S因子误差为56%，加入^{16}O基态ANC新数据后，精度提高到了10%[52]，如图16所示。

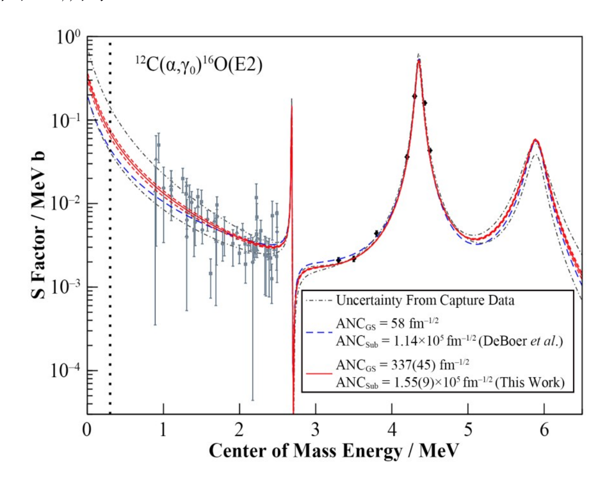


图16 ^{12}C(α, γ)^{16}O反应天体物理SE2因子[52]
数据点代表用直接测量数据约束的结果(误差为56%)；实线代表加入^{16}O基态ANC数据后的约束结果，误差减小为10%；与RMP最新的推荐值(虚线)[53]相比，新结果增加了55%
Fig.16 Astrophysical SE2 factor of ^{12}C(α, γ)^{16}O[52]
The data points represent the results of direct measurement (the uncertainty is 56%), the solid line represents the result of considering the data of ^{16}O ground state ANC (the uncertainty is reduced to 10%), and, compared with the latest value recommended by RMP (dashed line)[53], the new results increase by 55%.

根据恒星结构及演化理论，恒星级黑洞存在一个质量禁区，该禁区内的恒星核心的高能γ射线会有效地转换为正负电子对，γ射线的减少减弱了核心内部产生的热压力，并导致恒星迅速塌缩，进而产生超新星爆发并将恒星完全吹散。基于原子能院核天体物理团队对^{12}C(α，γ)^{16}O反应的研究，增大的^{12}C(α，γ)^{16}O天体物理反应率可以提高大质量恒星在核心氦燃烧结束之后^{16}O的丰度，增强的氧燃烧有利于产生更多的正负电子对，使得黑洞质量禁区的位置降低。原子能院核天体物理团队与国内外同行合作，针对^{12}C(α，γ)^{16}O反应对黑洞的影响开展了研究，结果使得黑洞质量禁区上限由原来的139倍太阳质量下降到132倍太阳质量，下限由59倍太阳质量下降到52倍太阳质量，如图17所示[54]。该结果为LIGO-Virgo发现的大量恒星级黑洞质量分布提供了可靠的理论解释[54]。

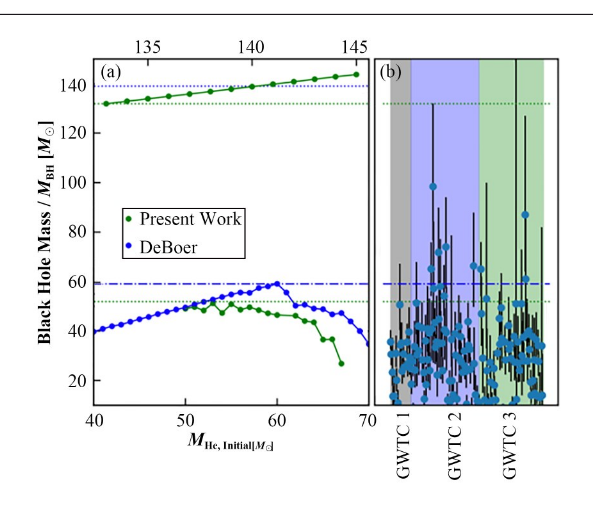


图17　(a) 黑洞质量与形成黑洞前的恒星氦核心初始质量间的关系，(b) LIGO-Virgo黑洞质量的数据[54]
图(a)中下面的点与虚线为基于本工作给出的$^{12}C(\alpha, \gamma)^{16}O$反应率预言的黑洞质量上下限，上面的点与虚线为基于最新编评反应率预言的黑洞质量上下限，可以看到两种预言的结果存在明显的差别

Fig.17　Relationship between the black hole mass and the initial mass of the He core of a star, which finally forms the black hole (a), and data of black hole mass measured by LIGO and Virgo (b)[54]. In the Fig.(a), the point and dashed line below are, respectively, the upper and lower limits based on the present work, and the point and dashed line above are, respectively, the upper and lower limits based on the latest review of reaction rates. There is an obvious difference between the two results.

4　结果和讨论

本文总结了原子能院核天体物理团队基于串列加速器开展的核天体物理研究，在次级束流线上开展的实验大多是采用ANC方法或谱因子方法，通过逆运动学测量转移反应研究了$^{7}Be(p, \gamma)^{8}B$、$^{11}C(p,\gamma)^{12}N$、$^{13}N(p,\gamma)^{14}O$、$^{8}Li(n,\gamma)^{9}Li$等天体物理重要反应的直接俘获过程的天体物理S因子或反应率，另外通过$^{6}He(d,n)^{7}Li$等反应得到的谱因子结果为建立(^{7}Li,^{6}He)等谱因子工具反应打好了实验基础。在这些研究的基础上发展了镜像核电荷对称性的ANC方法，拓宽了实验研究的范围。建立了厚靶弹性共振散射实验方法，通过^{13}N+p和^{17}F+p厚靶实验研究了^{14}O和^{18}Ne的共振能级，还通过$^{1}H(^{6}He,^{6}Li)n$电荷交换反应证明了^{6}Li第二激发态的中子-质子晕结构。希望在串列加速器超导后加速升级完成后可以进一步提升次级束流线放射性核束的能量和束流品质、增加束流种类，进而开展更多核天体物理感兴趣的不稳定核参与的核反应研究。

我们对Q3D磁谱仪的探测设备、数据获取、自动控制等方面不断进行升级改造，充分发挥了磁谱仪的分辨能力。同样基于谱因子或ANC方法通过测量(^{7}Li,^{6}He)、(^{7}Li,^{6}Li)、(^{9}Be,^{8}Li)等单核子转移反应及弹性转移反应研究了$^{12}C(p,\gamma)^{13}N$、$^{13}C(p,\gamma)^{14}N$、$^{15}N(n,\gamma)^{16}N$、$^{15}O(p,\gamma)^{16}F$、$^{8}Li(p,\gamma)^{9}Be$、$^{6}Li(n,\gamma)^{7}Li$、$^{11}B(p,\gamma)^{12}C$等单核子俘获反应，并将谱因子方法推广至阈上近阈共振的间接测量，得到了$^{25}Mg(p,\gamma)^{26}Al$反应58 keV共振的质子宽度和共振强度，拓展了间接方法的研究领域。另外，利用(^{11}B,^{7}Li)转移体系在Q3D磁谱仪完成了$^{13}C(\alpha,n)^{16}O$、$^{12}C(\alpha,\gamma)^{16}O$、$^{7}Li(^{6}Li,d)^{11}B$等反应的研究工作，建立了提取α谱因子的实验方法。

由于国际上另外两台Q3D磁谱仪已经退役，串列实验室的Q3D磁谱仪经不断升级改造，继续保持着稳定运行，这也吸引了国际上不少的关注及合作意向。核天体物理组计划继续通过测量转移反应开展对$^{14}N(p, \gamma)^{15}O$、$^{15}N(p, \gamma)^{16}O$、$^{16}O(p, \gamma)^{17}F$、$^{17}O(p, \gamma)^{18}F$、$^{18}O(p, \gamma)^{19}F$、$^{19}F(p, \gamma)^{20}Ne$、$^{20}Ne(p,\gamma)^{21}Na$、$^{26}Mg(p,\gamma)^{27}Al$、$^{27}Al(p,\gamma)^{28}Si$等碳氮氧循环和氖钠镁铝循环相关质子俘获反应的直接俘获过程及近阈共振的研究，同时也计划通过测量α基团转移反应对$^{9}Be(\alpha, n)^{12}C$、$^{17}O(\alpha, n)^{20}Ne$、$^{22}Ne(\alpha,n)^{25}Mg$、$^{16}O(\alpha,\gamma)^{20}Ne$等天体物理重要反应进行研究。

5　结语

中国原子能科学研究院核天体物理团队自成立至今30年，基于串列加速器国家实验室次级束流线与Q3D磁谱仪两大实验平台取得了丰硕的研究成果，30年里不断突破创新，探索研究的新方向，依托在串列实验室多年实验经验积累，打造了一支团结精干的研究团队，结合原子能院加速器和探测器方面研发的优势，建成了锦屏深地核天体物理实验平台这一全新的基地，永远致力于探寻核天体物理的最前沿。

致谢　核天体物理团队对制靶专家樊启文研究员、Q3D磁谱仪维护专家刘建成研究员表示衷心感谢，他们的付出是每一台实验顺利开展的基础；特别感谢原子能院核天体物理团队奠基人白希祥研究员。

作者贡献声明　李家英豪、李云居共同完成文章撰写、图片选取、文献整理等。所有作者对文章进行检查与修改。

参考文献

1　Bai X X, Liu W P, Qin J C, *et al*. A facility for production and utilization of radioactive beams[J]. Nuclear Physics A, 1995, **588**(1): c273 – c276. DOI: 10.1016/0375-9474(95)00151-p.

2 Liu W P, Bai X X, Zhou S H, *et al*. Angular distribution for the ^{7}Be(d, n)^{8}B reaction at $E_{c.m.}$=5.8 MeV and the $S_{17}(0)$ factor for the ^{7}Be(p, γ)^{8}B reaction[J]. Physical Review Letters, 1996, **77**(4): 611 – 614. DOI: 10.1103/PhysRevLett.77.611.

3 Li Z H, Guo B, Yan S Q, *et al*. The ^{13}N(d, n)^{14}O reaction and the astrophysical ^{13}N(p, γ)^{14}O reaction rate[J]. Physical Review C, 2006, **74**(3): 5801 – 5807. DOI: 10.1103/PhysRevC.74.035801.

4 Li Z H, Liu W P, Bai X X, *et al*. The ^{8}Li(d, p)^{9}Li reaction and the astrophysical ^{8}Li(n, γ)^{9}Li reaction rate[J]. Physical Review C, 2005, **71**(5): 2801 – 2805. DOI: 10.1103/PhysRevC.71.052801.

5 Decrock P, Delbar T, Duhamel P, *et al*. Determination of the ^{13}N(p, γ)^{14}O reaction cross section using a ^{13}N radioactive ion beam[J]. Physical Review Letters, 1991, **67**(7): 808 – 811. DOI: 10.1103/physrevlett.67.808.

6 Delbar T, Galster W, Leleux P, *et al*. Investigation of the ^{13}N(p, γ)^{14}O reaction using ^{13}N radioactive ion beams[J]. Physical Review C, 1993, **48**(6): 3088 – 3096. DOI: 10.1103/PhysRevC.48.3088.

7 Chupp T E, Kouzes R T, McDonald A B, *et al*. Total width of the 5.17 MeV 1^{-} state in ^{14}O and the hot-CNO cycle[J]. Physical Review C, Nuclear Physics, 1985, **31**(3): 1023 – 1025. DOI: 10.1103/physrevc.31.1023.

8 Fernandez P B, Adelberger E G, Garcia A. γ width of the unbound 5.17 MeV level of ^{14}O and the hot CNO cycle[J]. Physical Review C, 1989, **40**(5): 1887 – 1900. DOI: 10.1103/physrevc.40.1887.

9 Smith M S, Magnus P V, Hahn K I, *et al*. Gamma width of ^{14}O* (5.17 MeV) and the stellar ^{13}N(p, γ)^{14}O reaction rate[J]. Physical Review C, 1993, **47**(6): 2740 – 2750. DOI: 10.1103/physrevc.47.2740.

10 Magnus P V, Adelberger E G, García A. The hot CNO cycle ^{13}N(p, γ) resonance energy and the ^{18}Ne mass[J]. Physical Review C, 1994, **49**(4): R1755 – R1758. DOI: 10.1103/physrevc.49.r1755.

11 Motobayashi T, Takei T, Kox S, *et al*. Determination of the astrophysical ^{13}N(p, γ)^{14}O cross section through the Coulomb dissociation method[J]. Physics Letters B, 1991, **264**(3 – 4): 259 – 263. DOI: 10.1016/0370-2693(91)90345-q.

12 Kiener J, Lefebvre A, Aguer P, *et al*. Determination of the ^{13}N(p, γ)^{14}O reaction rate through the Coulomb break-up of a ^{14}O radioactive beam[J]. Nuclear Physics A, 1993, **552**(1): 66 – 81. DOI: 10.1016/0375-9474(93)90331-q.

13 Decrock P, Gaelens M, Huyse M, *et al*. Study of the ^{13}N(d, n)^{14}O reaction cross section and its astrophysical implications for the ^{13}N proton capture reaction[J]. Physical Review C, Nuclear Physics, 1993, **48**(4): 2057 – 2067. DOI: 10.1103/physrevc.48.2057.

14 Tang X D, Azhari A, Fu C B, *et al*. Determination of the direct capture contribution for ^{13}N(p, γ)^{14}O from the ^{14}O→^{13}N+p asymptotic normalization coefficient[J]. Physical Review C, 2004, **69**(5): 055807. DOI: 10.1103/physrevc. 69.055807.

15 Liu W P, Li Z H, Bai X X, *et al*. Determination of ^{11}C(p, γ)^{12}N astrophysical S-factor via measurement of ^{11}C(d, n)^{12}N reaction[J]. Nuclear Physics A, 2003, **728**(1 – 2): 275 – 284. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2003.08.017.

16 Zeng S, Liu W P, Li Z H, *et al*. Measurement of ^{2}H(^{8}Li, ^{9}Be)$_{n}$ reaction relevant to primordial nucleosynthesis[J]. Chinese Physics Letters, 2005, **22**(9): 2219 – 2221. DOI: 10.1088/0256-307x/22/9/022.

17 Guo B, Li Z H, Liu W P, *et al*. The ^{8}Li(d, p)^{9}Li reaction and astrophysical ^{8}B(p, γ)^{9}C reaction rate[J]. Nuclear Physics A, 2005, **761**(1 – 2): 162 – 172. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2005.07.013.

18 郭冰, 柳卫平, 李志宏, 等. ^{11}C(d, n)^{12}N反应角分布的测量和虚衰变^{12}N→^{11}C+p渐近归一化系数的确定[J]. 原子能科学技术, 2005, **39**(2): 118 – 123. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2005.02.006.

GUO Bing, LIU Weiping, LI Zhihong, *et al*. Measurement of angular distribution for ^{11}C(d, n)^{12}N reaction and determination of asymptotic normalization coefficient for the virtual decay ^{12}N→^{11}C+p[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2005, **39**(2): 118 – 123. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2005.02.006.

19 Guo B, Li Z H. Determination of astrophysical ^{13}N(p,γ)^{14}O S-factors from the asymptotic normalization coefficient of $^{14\rightarrow13}$C+n[J]. Chinese Physics Letters, 2007, **24**(1): 65 – 68. DOI: 10.1088/0256-307x/24/1/018.

20 郭冰, 李志宏, 柳卫平, 等. ^{27}P基态晕结构和激发态质子宽度的研究[J]. 高能物理与核物理, 2006, **30**(2): 183 – 185.

GUO Bing, LI Zhihong, LIU Weiping, *et al*. Study of halo for the ground state and proton widths for the first two excited states of ^{27}P[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2006, **30**(2): 183 – 185.

21 Li Z H, Liu W P, Bai X X, *et al*. First observation of neutron-proton halo structure for the 3.563 MeV 0^{+} state in ^{6}Li via ^{1}H(^{6}He, ^{6}Li)n reaction[J]. Physics Letters B,

2002, **527**(1－2): 50－54. DOI: 10.1016/S0370-2693(02)01172-3.

22 Li Z H, Liu W P, Bai X X, *et al*. Search for the halo effect in the ^{1}H(^{6}He, ^{6}Li)n reaction[J]. Chinese Physics Letters, 2002, **19**(3): 306－308. DOI: 10.1088/0256-307x/19/3/306.

23 Wang Y B, Wang B X, Qin X, *et al*. ^{13}N+p elastic resonance scattering via a thick-target method[J]. Physical Review C, 2008, **77**(4): 044304. DOI: 10.1103/physrevc.77.044304.

24 Wang Y B, Qin X, Wang B X, *et al*. Simulation and analysis of ^{13}N+p elastic resonance scattering[J]. Chinese Physics C, 2009, **33**(3): 181－186. DOI: 10.1088/1674-1137/33/3/004.

25 Jin S J, Wang Y B, Wang B X, *et al*. Excited states in ^{18}Ne studied via ^{17}F+p[J]. Chinese Physics Letters, 2010, **27**(3): 032102. DOI: 10.1088/0256-307x/27/3/032102.

26 Li Z C, Cheng Y H, Yan C, *et al*. Beijing Q3D magnetic spectrometer and its applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1993, **336**(1－2): 150－161. DOI: 10.1016/0168-9002(93)91091-z.

27 Li Z H, Li E T, Guo B, *et al*. First measurement of the ^{2}H(^{6}He,^{7}Li)n angular distribution and proton spectroscopic factor in ^{7}Li[J]. The European Physical Journal A, 2010, **44**(1): 1－5. DOI: 10.1140/epja/i2010-10944-8.

28 Li Z H, Su J, Guo B, *et al*. Determination of the ^{12}C(p, γ)^{13}N reaction rates from the ^{12}C(^{7}Li, ^{6}He)^{13}N reaction[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2010, **53**(4): 658－663. DOI: 10.1007/s11433-010-0128-8.

29 Li Y J, Li Z H, Li E T, *et al*. New determination of the astrophysical ^{13}C(p, γ)^{14}N S(E) factors and reaction rates via the ^{13}C(^{7}Li,^{6}He)^{14}N reaction[J]. The European Physical Journal A, 2012, **48**(2): 13. DOI: 10.1140/epja/i2012-12013-x.

30 Li Z H, Li Y J, Su J, *et al*. New determination of the proton spectroscopic factor in ^{9}Be from the ^{13}C(^{9}Be,^{8}Li)^{14}N angular distribution[J]. Physical Review C, 2013, **87**: 017601. DOI: 10.1103/physrevc.87.017601.

31 Su J, Li Z H, Guo B, *et al*. Astrophysical reaction rates of the ^{8}Li(p, γ)^{9}Be$_{g.s.}$ direct capture reaction[J]. Chinese Physics Letters, 2006, **23**(1): 55－57. DOI: 10.1088/0256-307x/23/1/017.

32 Li Y J, Li Z H, Li E T, *et al*. Indirect measurement of the 57.7 keV resonance strength for the astrophysical γ-ray source of the ^{25}Mg(p, γ)^{26}Al reaction[J]. Physical Review C, 2020, **102**(2): 025804. DOI: 10.1103/physrevc. 102. 025804.

33 Guo B, Li Z H, Li Y J, *et al*. Spectroscopic factors for low-lying ^{16}N levels and the astrophysical ^{15}N(n, γ)^{16}N reaction rate[J]. 2014, **89**(1): 2801－2805. DOI: 10.1103/PhysRevC.89.012801.

34 Wu Z D, Guo B, Li Z H, *et al*. Proton widths of the low-lying ^{16}F states from the ^{15}N(^{7}Li, ^{6}Li)^{16}N reaction[J]. Physical Review C, 2014, **89**(5): 4315－4310. DOI: 10.1103/PhysRevC.89.054315.

35 Gan L, Sun H B, Li Z H, *et al*. Experimental study of the spectroscopic factors of $^{90-97}$Zr[J]. Physical Review C, 2018, **97**(6): 064614. DOI: 10.1103/physrevc.97.064614.

36 Gan L, Sun H B, Li Z H, *et al*. Experimental study of the spectroscopic factors of $^{116-125}$Sn[J]. Physical Review C, 2020, **101**(1): 014612. DOI: 10.1103/physrevc. 101. 014612.

37 Su J, Li Z H, Guo B, *et al*. Neutron spectroscopic factors of ^{7}Li and astrophysical ^{6}Li(n, γ)^{7}Li reaction rates[J]. Chinese Physics Letters, 2010, **27**(5): 052101. DOI: 10.1088/0256-307x/27/5/052101.

38 Li E T, Li Z H, Li Y J, *et al*. Proton spectroscopic factor of the ^{12}C ground state from the ^{12}C(^{11}B, ^{12}C)^{11}B elastic transfer reaction[J]. Physical Review C, 2014, **90**(6): 067601. DOI: 10.1103/physrevc.90.067601.

39 Kubono S, Abe K, Kato S, *et al*. Determination of the subthreshold state contribution in ^{13}C(α, n)^{16}O, the main neutron-source reaction for the s process[J]. Physical Review Letters, 2003, **90**(6): 062501. DOI: 10.1103/physrevlett.90.062501.

40 Johnson E D, Rogachev G V, Mukhamedzhanov A M, *et al*. Astrophysical reaction rate for the neutron-generator reaction ^{13}C(α, n)^{16}O in asymptotic giant branch stars[J]. Physical Review Letters, 2006, **97**(19): 192701. DOI: 10.1103/physrevlett.97.192701.

41 Pellegriti M G, Hammache F, Roussel P, *et al*. Indirect study of the ^{13}C(α, n)^{16}O reaction *via* the ^{13}C(^{7}Li, t)^{17}O transfer reaction[J]. Physical Review C, 2008, **77**(4): 2801－2805. DOI: 10.1103/physrevc.77.042801.

42 Guo B, Li Z H, Lugaro M, *et al*. New determination of the ^{13}C(α, n)^{16}O reaction rate and its influence on the s-process nucleosynthesis in AGB stars[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2012, **756**(2): 193. DOI: 10.1088/0004-637x/756/2/193.

43 Costantini H, Formicola A, Imbriani G, *et al*. LUNA: a laboratory for underground nuclear astrophysics[J]. Reports on Progress in Physics, 2009, **72**(8): 086301. DOI: 10.1088/0034-4885/72/8/086301.

44 Kurath D. Alpha-structure amplitudes for the 1p shell[J]. Physical Review C, 1973, **7**(4): 1390 – 1395. DOI: 10.1103/physrevc.7.1390.

45 Rudchik A A, Rudchik A T, Kozeratska G M, *et al*. ^{7}Li+^{11}B elastic and inelastic scattering in a coupled-reaction-channels approach[J]. Physical Review C, 2005, **72**(3): 034608. DOI: 10.1103/physrevc.72.034608.

46 Shen Y P, Guo B, Ma T L, *et al*. First experimental constraint of the spectroscopic amplitudes for the α-cluster in the ^{11}B ground state[J]. Physics Letters B, 2019, **797**: 134820. DOI: 10.1016/j.physletb.2019.134820.

47 Weaver T A, Woosley S E. Nucleosynthesis in massive stars and the ^{12}C(α, γ)^{16}O reaction rate[J]. Physics Reports, 1993, **227**(1 – 5): 65 – 96. DOI: 10.1016/0370-1573(93)90058-L.

48 Magnus P V, Adelberger E G, García A. The hot CNO cycle ^{13}N(p, γ) resonance energy and the ^{18}Ne mass[J]. Physical Review C, 1994, **49**(4): R1755 – R1758. DOI: 10.1103/physrevc.49.r1755.

49 Motobayashi T, Takei T, Kox S, *et al*. Determination of the astrophysical ^{13}N(p, γ)^{14}O cross section through the Coulomb dissociation method[J]. Physics Letters B, 1991, **264**(3 – 4): 259 – 263. DOI: 10.1016/0370-2693(91)90345-Q.

50 Kiener J, Lefebvre A, Aguer P, *et al*. Determination of the astrophysical ^{13}N(p, γ)^{14}O reaction rate through the Coulomb break-up of a ^{14}O radioactive beam[J]. Nuclear Physics A, 1993, **552**(1): 66 – 81. DOI: 10.1016/0375-9474(93)90331-q.

51 Decrock P, Gaelens M, Huyse M, *et al*. Study of the ^{13}N(d, n)^{14}O reaction cross section and its astrophysical implications for the ^{13}N proton capture reaction[J]. Physical Review C, Nuclear Physics, 1993, **48**(4): 2057 – 2067. DOI: 10.1103/physrevc.48.2057.

52 Shen Y P, Guo B, de Boer R J, *et al*. Constraining the external capture to the ^{16}O ground state and the E2 S factor of the ^{12}C(α, γ)^{16}O reaction[J]. Physical Review Letters, 2020, **124**(16): 162701. DOI: 10.1103/physrevlett.124.162701.

53 de Boer R J, Görres J, Wiescher M, *et al*. The ^{12}C(α,γ)^{16}O reaction and its implications for stellar helium burning[J]. Reviews of Modern Physics, 2017, **89**(3): 035007. DOI: 10.1103/revmodphys.89.035007.

54 Shen Y P, Guo B, de Boer R J, *et al*. New determination of the ^{12}C(α, γ)^{16}O reaction rate and its impact on the black-hole mass gap[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2023, **945**(1): 41. DOI: 10.3847/1538-4357/acb7de.